

ЭКОЛОГИЯ

УДК 630*52:630*174.754+630*16:582.475.4

В.А. Усольцев

Уральский государственный лесотехнический университет,
Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург

ГЕОГРАФИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ КЕДРОВЫХ ЭКОСИСТЕМ В АЗИИ

Аннотация. Установлены статистически значимые закономерности изменения фитомассы, первичной продукции и удельной первичной продукции по экорегионам Азии в пределах ареалов кедра сибирского, корейского и кедрового стланика.

Ключевые слова. *Pinus sibirica* Du Tour, *P. koraiensis* S. et Z., *P. pumila* (Pall.) Regel, фитомасса, первичная продукция, удельная первичная продукция, географические закономерности.



V.A. Usoltsev

GEOGRAPHY OF THE BIOLOGICAL PRODUCTIVITY OF CEDAR PINES IN ASIA

Abstract. Statistically significant regularities of biomass, primary production and relative primary production of cedar pines (*Pinus sibirica* Du Tour, *P. koraiensis* S. et Z. and *P. pumila* (Pall.) Regel) change according to Asian regions are stated.

Keywords. *Pinus sibirica* Du Tour, *P. koraiensis* S. et Z., *P. pumila* (Pall.) Regel, live biomass, primary production, relative primary production, geographical patterns.

В фундаментальном учении В.И. Вернадского была раскрыта планетарная роль живого вещества и его эволюции в связи с космической организованностью биосферы. «Как солнечные излучения, так и космические, - писал А.Л. Чижевский (1976), - являются главнейшими источниками энергии, оживляющей поверхностные слои земного шара» (с. 29). Первичная продуктивность растительного покрова является основой функционирования биосферы, и от нее зависит жизнь человека и всех гетеротрофных организмов, но лишь в последние 30-40 лет представление о продукционной

способности биосферы вышло за рамки "просвещенных догадок" и получило некоторое количественное подтверждение (Whittaker et al., 1975).

Исследования второй половины XX столетия в области экологии привели к тому, что стали очевидными, по крайней мере, четыре положения (Lieth, 1975):

- представление о возможном неограниченном росте и благосостоянии человеческой популяции является самообманом и ведет к ее деградации;
- спонтанное увеличение человеческой популяции за пределы, обеспечивающие устойчивое функционирование биосферы, должно рассматриваться как моральное преступление;
- непрерывное наращивание валового национального продукта промышленно развитыми странами ценой благосостояния человечества в целом должно расцениваться как социальное преступление;
- безрассудная эксплуатация ресурсов ископаемого топлива во имя краткосрочной выгоды вместо тщательно спланированного долго-срочного его использования является преступлением против наших будущих поколений.

Перечисленные положения были сведены Н.Н. Моисеевым (1988) в понятие экологического императива.

Биологическая продуктивность лесов рассматривается как их основная характеристика, определяющая ход процессов в лесных экосистемах и используемая в целях оценки углерододепонирующей емкости лесов, экологического мониторинга, устойчивого ведения лесного хозяйства, моделирования продуктивности лесов с учетом глобальных изменений, изучения структуры и биоразнообразия лесного покрова (Fowler et al., 2002).

Роль лесов в глобальном углеродном балансе сегодня является экологической загадкой, суть которой состоит в противоречии между результатами прямых измерений и косвенных (модельных) расчетов потоков углерода. В первом случае оказывается, что имеется некий «недостающий источник» выделений углерода в атмосферу, а во втором выявляется «недостающий сток» атмосферного углерода (Вудвелл, Хафтон, 1997). Поэтому для мирового научного сообщества изучение биологической продуктивности и углерододепонирующей способности лесов в географическом аспекте является одним из наиболее приоритетных направлений.

Биологическая продуктивность в нашем исследовании понимается как совокупность трех количественных характеристик лесной экосистемы: фитомассы (в т/га), чистой первичной продукции (ЧПП), определяемой как количество фитомассы, продуцируемой на единице площади за 1 год (в т/га) и удельной чистой первичной продукции (УдЧПП) как отношения ЧПП к фитомассе (в относительных единицах или процентах).

Методические подходы и результаты оценки фитомассы и ЧПП лесов в литературе изложены детально (Уткин, 1975; Satoo, Madgwick, 1982; Gower et al., 1997; Clark et al., 2001; Усольцев, 2007). Но количественным

показателям УдЧПП, характеризующей скорость обновления органического вещества фитомассы (Базилевич и др., 1986), посвящены лишь единичные работы последних лет (Уткин и др., 2004; Гульбе и др., 2010), хотя в традиционной лесной таксации подобный показатель в «урезанном» виде, т.е. в виде процента текущего прироста по запасу стволов исследуется давно (Турский, 1925; Орлов, 1928; Науменко, 1946; Prodan, 1951; Анучин, 1952; Кайрюкшис, 1969; Wenk, 1973а,б; Антанайтис, Загреев, 1981; Хлюстов, Макаренко, 1983; Бузыкин и др., 1991). Если ЧПП характеризует интенсивность фотосинтеза и депонирования углерода, то УдЧПП показывает удельную скорость процесса: как быстро «работает» или «превращается» один грамм вещества. Обратная величина – отношение фитомассы к ЧПП – показывает, за какое время поток ЧПП создает наличный запас фитомассы (Базилевич, Титлянова, 2008).

Изучению названных трех показателей биологической продуктивности на примере кедровых сосен, произрастающих на азиатском материке, посвящена настоящая работа.

Цель исследования: на основе сформированной базы данных о фитомассе и ЧПП кедровых сосен – кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour), корейского (*P. koraiensis* S. et Z.) и кедрового стланика (*P. pumila* (Pall.) Regel), полученных на пробных площадях в пределах их азиатских ареалов, разработать систему регрессионных моделей и установить географические закономерности распределения фитомассы, ЧПП и УдЧПП названных древесных пород.

Объекты, методы исследования и объем выполненных работ

С целью исследования межвидовых и региональных особенностей распределения фитомассы кедровых сосен в пределах их ареалов на территории Азии по 60 литературным источникам нами сформирована база данных в количестве 180 пробных площадей. Из них 98 пробных площадей заложены в древостоях кедра сибирского (Урал, Западная Сибирь, Средняя Сибирь, Алтай и Забайкалье), 47 пробных площадей - в древостоях кедра корейского (Дальний Восток России, Северо-Восточный Китай и Южная Корея) и 35 пробных площадей - кедровостланиках (Дальний Восток, Забайкалье и Япония). Их территориальное распределение дано на рис. 1.

Данные о ЧПП и фитомассе кедровников представлены в значительно меньшем количестве и в меньшем числе экорегионов: из 8 литературных источников взяты данные 24 пробных площадей, заложенных в древостоях кедра сибирского (Западная Сибирь) и кедра корейского (Северо-Восточный Китай) и 13 пробных площадей для кедрового стланика Колымы и Японии (рис. 2).

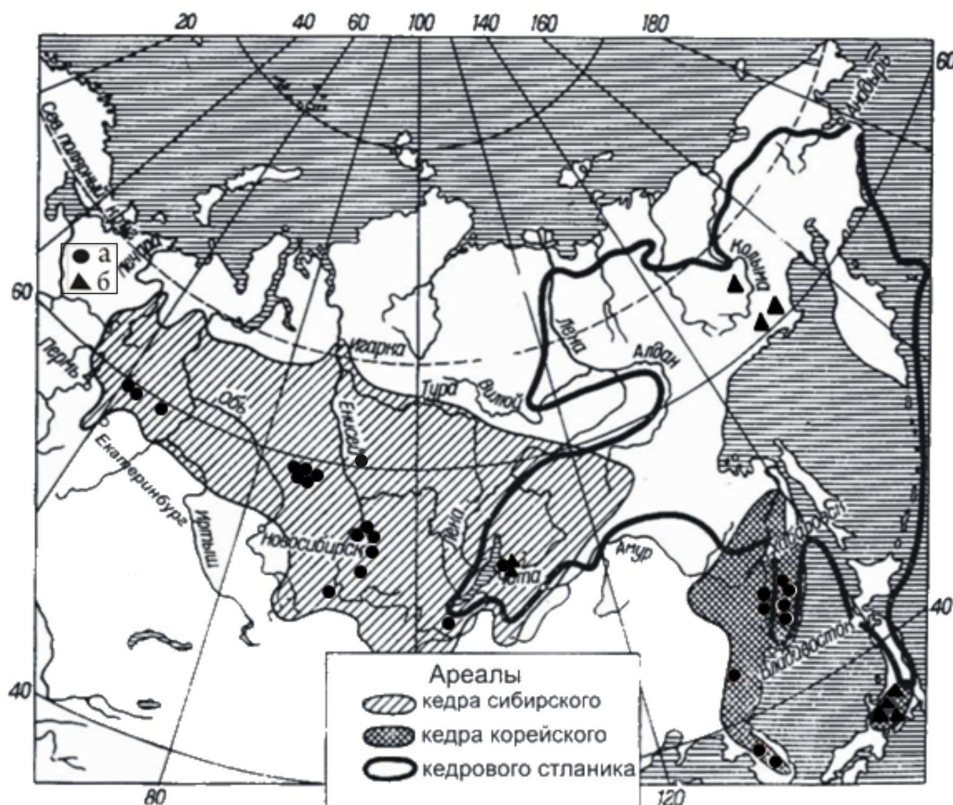


Рис. 1. Местоположение пробных площадей с определениями фитомассы кедровых сосен в их ареалах, по И.Ю. Коропачинскому (1983); насаждения: а- кедров сибирского и корейского, б- кедрового стланика.

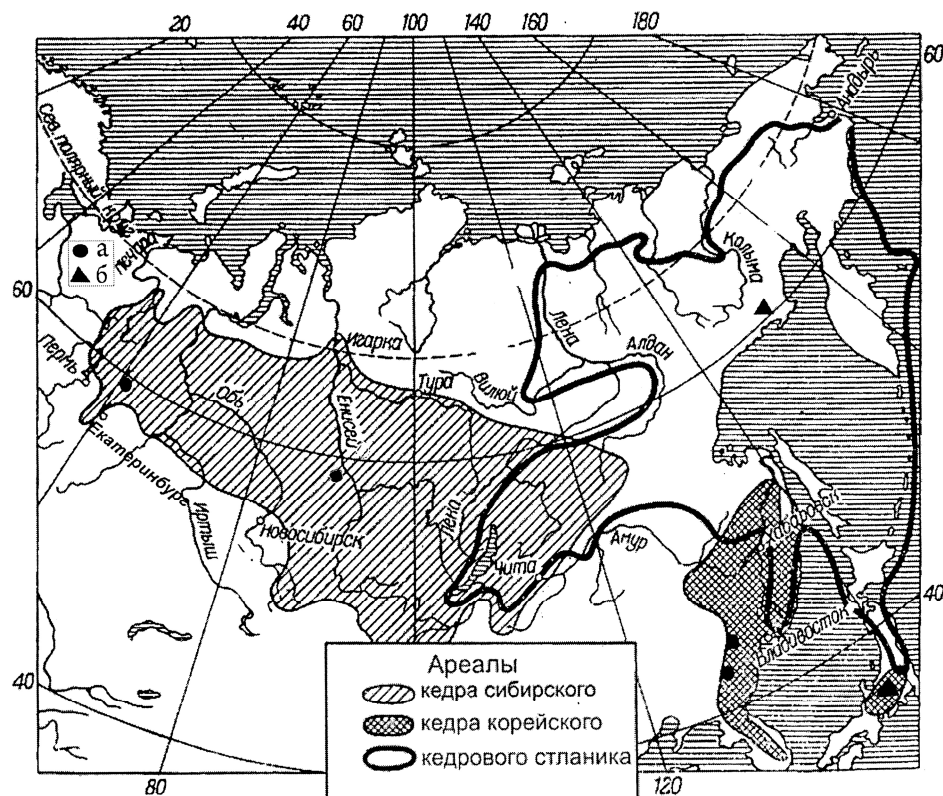


Рис. 2. Местоположение пробных площадей с определениями ЧПП кедровых сосен в их ареалах, по И.Ю. Коропачинскому (1983); насаждения: а - кедров сибирского и корейского, б - кедрового стланика.

Поскольку для Уральского экорегиона какие-либо данные о фито-массе и ЧПП кедровников отсутствуют, нами были заложены для этой цели пробные площади в темнохвойных насаждениях Новолялинского лесничества Свердловской области. Исследованные насаждения относятся к Западно-Сибирской равнинной лесной области, Зауральской холмисто-предгорной провинции, среднетаежному округу (Колесников и др., 1973) (рис. 3).



Рис. 3. Место закладки пробных площадей в кедровниках Новолялинского лесничества (отмечено кружком) на карте-схеме лесничеств Свердловской области (<http://forest.midural.ru/article/show/id/113>).

В основу исследования положен метод пробных площадей и модельных деревьев (рис. 4). Пробные площади заложены с учетом ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные». Для определения фитомассы и ЧПП деревьев и древостоев взяты модельные деревья. После рубки ствол делили на 10 секций, на середине каждой и на расстоянии 1,3 м от комля выпиливали диски и определяли диаметры ствола в коре и без коры.



Рис. 4. Взвешивание кроны кедра сибирского на пробной площади.

По этим замерам рассчитывали объем древесины и коры. Прирост древесины ствола определен путем “расчехления” ствола по 10 отрезкам и определения годичного радиального и объемного прироста, среднего за последние 5 лет, с последующим пересчетом объема и объемного прироста на единицы массы в абсолютно сухом состоянии по базисной плотности, определенной по дискам. Прирост коры рассчитан по приросту древесины и соотношению массы древесины и коры ствола. У дисков, взятых на относительных высотах 20, 50 и 80% от общей высоты дерева (рис. 5), отделяли кору, взвешивали отдельно древесину и кору с точностью до 0,1 г, сушили и термовесовым методом рассчитывали абсолютно сухую фитомассу древесины и коры ствола (Усольцев, 2007). Фитомасса структурных частей кроны определялась после ее деления на три одинаковые по длине секции. После взвешивания каждой секции кроны с точностью до 50 г производилось деление их на охвоенные и неохвоенные ветви и последние взвешивались. Затем из охвоенной части каждой секции отбиралась проба (около 0,5 кг), взвешивалась с точностью до 1 г, затем от нее отделялась

вручную хвоя, в том числе хвоя текущего года, которые взвешивались отдельно. Для определения содержания сухого вещества (ССВ) в массе хвои (листвы) и ветвей из каждой части кроны взяты их образцы, которые взвешивали с точностью до 0,01 г и сушили (рис. 6). По полученным значениям рассчитывали абсолютно сухую массу хвои (листвы) и ветвей дерева. ЧПП ветвей определена методом, предложенным А.И. Русаленко и Е.Г. Петровым (1975).



Рис. 5. Выпилы, взятые на высоте груди и на относительных высотах 20, 50 и 80% от общей высоты ствола.



Рис. 6. Сушка образцов хвои и коры в сушильном шкафу.

Заложены 13 пробных площадях в кедровниках в возрасте от 82 до 118 лет (табл. 1) с долей кедра в составе от 50 до 80% (рис. 7).

Таблица 1 - Таксационные показатели, фитомасса, ЧПП и УдЧПП кедровников по данным пробных площадей Новолялинского лесничества*

№	А, лет	N, тыс. шт/га	D, см	H, м	M, м ³ /га	Фитомасса, т/га				ЧПП, т/га				УдЧПП, %			
						Ство- лы	Вет- ви	Хвоя	Все- го	Ство- лы	Вет- ви	Хвоя	Все- го	Ство- лы	Вет- ви	Хвоя	Об- щая
1	107	1,471	20,4	21,2	567	193,2	22,6	11,2	226,9	3,05	0,87	2,74	6,66	1,6	3,8	24,5	2,9
2	118	0,916	20,3	24,4	313	110,6	14,5	7,80	132,9	1,94	0,54	1,73	4,21	1,8	3,7	22,2	3,2
3	90	1,121	22,2	17,7	430	150,0	16,7	9,11	175,8	2,51	0,64	1,83	4,98	1,7	3,8	20,1	2,8
4	99	0,282	42,7	20,2	472	170,3	19,4	9,41	199,2	2,55	0,72	2,25	5,53	1,5	3,7	23,9	2,8
5	82	1,257	18,0	15,8	297	177,1	24,7	14,0	215,8	3,50	0,92	2,92	7,33	2,0	3,7	20,8	3,4
6	87	0,678	20,0	16,9	243	86,5	9,7	4,63	100,7	1,48	0,41	1,26	3,14	1,7	4,2	27,2	3,1
7	103	1,045	20,6	21,1	400	140,8	16,1	8,15	165,0	2,17	0,60	1,84	4,61	1,5	3,7	22,6	2,8
8	109	0,875	24,0	19,8	482	164,5	19,1	9,94	193,5	2,32	0,63	2,01	4,96	1,4	3,3	20,2	2,6
9	93	1,483	19,4	16,7	548	186,7	21,1	9,75	217,6	2,54	0,73	2,32	5,59	1,4	3,5	23,8	2,6
10	103	0,966	22,3	18,7	449	164,8	19,7	8,77	193,3	2,17	0,62	2,02	4,81	1,3	3,1	23,0	2,5
11	87	1,083	21,6	17,7	478	179,8	22,2	9,60	211,6	2,20	0,63	2,16	4,99	1,2	2,8	22,5	2,4
12	101	1,358	18,5	16,8	506	161,3	16,7	7,57	185,6	1,91	0,54	1,62	4,07	1,2	3,2	21,4	2,2
13	90	1,258	18,6	19,8	394	139,2	15,5	7,60	162,4	1,98	0,55	1,59	4,11	1,4	3,5	20,9	2,5

* А – возраст древостоя; N – густота древостоя; D и H – соответственно средние диаметр на высоте груди и высота древостоя; M – запас стволовой древесины.

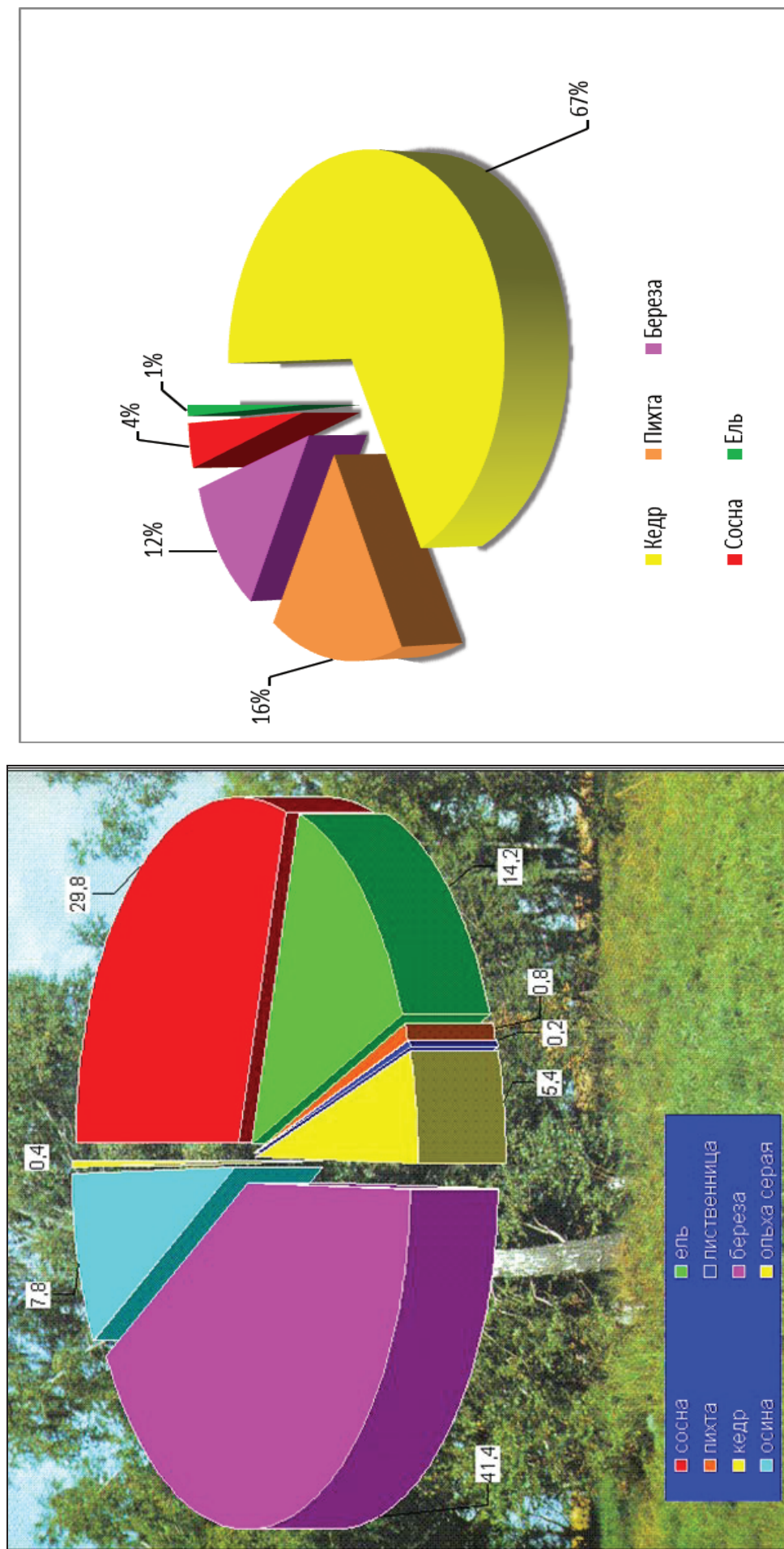


Рис. 7. Распределение по породному составу площади лесов Новолялинского лесничества по данным лесоустройства (слева) и кедровников на заложённых 13 пробных площадях (справа)

На заложенных пробных площадях в естественных кедровниках в возрасте от 82 до 118 лет (таблица 1) взято более 70 модельных деревьев (14-15 модельных деревьев по каждой породе, участвующей в составе древостоев). Из крон модельных деревьев взято 248 навесок, в том числе 44 – кедров сибирского, 52 – ели, 50 – пихты, 60 – сосны и 42 – березы. Общее количество выпилов из стволов модельных деревьев – 295, в том числе кедров сибирского – 33, ели – 50, пихты – 50, сосны – 75 и березы – 87.

Результаты и обсуждение

1. География фитомассы кедровников

Поскольку кедров сибирский и корейский, с одной стороны, близки по своей морфоструктуре, а с другой – произрастают в разных природных зонах и имеют отдельные, взаимно не перекрывающиеся ареалы, мы поставили задачу выяснить, есть ли различия в структуре фитомассы кедров сибирского и корейского, экспериментально оцененной на заложенных пробных площадях. Для этого использована сформированная нами база данных в количестве 193 пробных площадей.

Учитывая, что совокупность показателей биопродуктивности в пределах региона сильно варьирует в связи с различиями возраста, добротности произрастания и морфологии полога, для обеспечения корректности сопоставлений анализируются не обезличенные совокупности наблюдений, а многофакторные уравнения, объясняющие изменчивость переводных коэффициентов фитомассы (P_i/M) в пределах региона посредством включенных в них переменных:

$$\ln(P_i/M) = f(\ln A, \ln H, \ln D, \ln N), \quad (1)$$

где A , N , D , H и M – соответственно возраст (лет), густота (тыс. экз./га), средний диаметр (см), средняя высота (м) и запас стволовой древесины ($\text{м}^3/\text{га}$); P_i – масса стволов, ветвей, хвои ($\text{т}/\text{га}$): P_S , P_B , P_F , соответственно.

Для выявления межвидовых различий в фитомассе кедров сибирского и корейского уравнение (1) модифицировано путем введения бинарной переменной X , представляющей простейшую модификацию фиктивной переменной (Дрейпер, Смит, 1973):

$$\ln(P_i/M) = f(\ln A, \ln H, \ln D, \ln N, X). \quad (2)$$

В уравнении (2) бинарная переменная $X = 0$ для кедров сибирского и $X=1$ – для кедров корейского; R^2 варьирует от 0,70 до 0,91. Их константы здесь и далее значимы на уровне t_{05} и выше. Реализован рекурсивный принцип, со-

гласно которому уравнение (2) совмещается с возрастными трендами массообразующих показателей и запаса древостоя:

$$\ln H = f(\ln A, X) \rightarrow \ln D = f(\ln A, \ln H, X) \rightarrow \ln N = f(\ln A, \ln H, \ln D, X) \rightarrow \rightarrow \ln M = f(\ln H, \ln D, \ln N, X), \quad (3)$$

в которых R^2 превышает 0,95, за исключением уравнения для N (0,47). Рекурсивный принцип и блоковые фиктивные переменные обеспечили последовательное накопление региональных различий в возрастной динамике массообразующих показателей и запасов стволовой древесины по цепочке взаимозависимых уравнений. Путем табулирования уравнений (3) и затем – (2) составлена таблица возрастной динамики морфометрических показателей и фитомассы кедров сибирского и корейского. Установлено, что различие показателей как надземной, так и общей фитомассы древостоев кедров сибирского и корейского, полученной на пробных площадях в пределах их ареалов, статистически не достоверно, но в соотношениях ее фракций расхождения между двумя породами существенные.

Хотя по общим совокупностям данных о фитомассе кедров сибирского и корейского достоверного различия по общей фитомассе не выявлено, мы попытались выяснить, будут ли иметь место различия, если данные по обеим породам стратифицировать в географическом аспекте. Экспериментальные данные после нанесения на схему зонально-провинциального деления территории Азии нами распределены по 8 экорегионам, закодированным соответствующими блоковыми фиктивными переменными (табл. 2). Каждый блок переменных (X_0, \dots, X_7), представляет группу пробных площадей, приходящуюся на данный экорегион.

Таблица 2 - Схема кодирования блоковыми переменными региональных массивов данных о фитомассе кедров сибирского и корейского

Экорегион*	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
УРср (<i>Pinus sibirica</i>)	0	0	0	0	0	0	0
ЗСюж (<i>P. sibirica</i>)	1	0	0	0	0	0	0
ССср (<i>P. sibirica</i>)	0	1	0	0	0	0	0
АСюж (<i>P. sibirica</i>)	0	0	1	0	0	0	0
ЗБюж (<i>P. sibirica</i>)	0	0	0	1	0	0	0
ДВхш (<i>P. koraiensis</i>)	0	0	0	0	1	0	0
Кит (<i>P. koraiensis</i>)	0	0	0	0	0	1	0
ЮК (<i>P. koraiensis</i>)	0	0	0	0	0	0	1

*Обозначения экорегионов в таблице 2: УРср – Уральская провинция, средняя тайга; ЗСюж – Западно-Сибирская равнинная провинция, южная тайга; ССср – Средне-Сибирская плоскогорная провинция, средняя тайга; АСюж – Алтае-Саянская горная провинция, южная тайга; ЗБюж – Забайкальская провинция, южная тайга; ДВхш – Дальний Восток, хвойно-широколиственные леса; Кит – Северо-Восточный Китай; ЮК – Южная Корея.

Выделенные регионы, закодированные блоковыми фиктивными переменными X_0, \dots, X_7 (Дрейпер, Смит, 1973), включены в уравнения (1) с целью установления степени отличия показателей фитомассы каждого региона от базового, соответствующего насаждениям кедров сибирского подзоны средней тайги на Урале:

$$\ln(P_i/M) = f(X_0, \dots, X_7, \ln A, \ln H, \ln D, \ln N). \quad (4)$$

Полученная расчетом характеристика уравнений (5) подтверждает их достаточную адекватность фактическим данным ($R^2 = 0,82-0,89$). Уравнения (4) «работают» по принципу “Что будет, если...?” и обеспечивают сопоставимость фракционного состава фитомассы разных регионов, если в эти уравнения подставить соответствующие характеристики насаждений: A, H, D, N и M , определяемые рекурсивной цепочкой взаимозависимых уравнений:

$$\begin{aligned} \ln H &= f(X_0, \dots, X_7, \ln A, (\ln A)^2) \rightarrow \ln D = f(X_0, \dots, X_7, \ln A, \ln H) \rightarrow \\ &\rightarrow \ln N = f(X_0, \dots, X_7, \ln A, \ln H, \ln D) \rightarrow \ln M = f(X_0, \dots, X_7, \ln H, \ln D, \ln N). \end{aligned} \quad (5)$$

Последовательным табулированием систем уравнений (5) и (4) по задаваемым значениям возраста получены возрастные тренды всех массообразующих показателей и запасов фитомассы кедровников по каждому экорегиону. Анализ фитомассы кедровников подтверждает наличие профиля продуктивности по зональному градиенту. Запасы фитомассы кедров сибирского и корейского в возрасте 100 лет закономерно возрастают в направлении от Сибири до Корейского полуострова, составляя в средней тайге 78, в южной тайге Западной Сибири и Забайкалья 110-176, в хвойно-широколиственных лесах Приморья 137-197 и в широколиственных лесах Южной Кореи 537 т/га. По провинциальному градиенту (в направлении с запада на восток) названный показатель последовательно снижается от 207 т/га на Урале до 78 т/га в Средней Сибири, а затем возрастает с 110 т/га в Забайкалье до 137 т/га в Приморье.

Путем наложения расчетных данных фитомассы кедровников с известными координатами на схемы изоконт (по А.А. Борисову, 1967) и изотерм (Tuhkanen, 1984) составлена двухвходовая таблица, в которой входами служат значения индекса континентальности климата (IC) и среднемесячной суммы эффективных температур (T), и по данным этой таблицы рассчитаны уравнения

$$\ln P_{abo} = 6,704 - 1,791(\ln IC) + 1,453(\ln T), \quad R^2 = 0,684; \quad SE = 0,46; \quad (6)$$

$$\ln P_{tot} = 10,574 - 2,259(\ln IC) + 1,028(\ln T), \quad R^2 = 0,761; \quad SE = 0,34; \quad (7)$$

где P_{abo} и P_{tot} – расчетные значения соответственно надземной и общей фитомассы кедровников в возрасте 100 лет, т/га. Установлена статистически достоверная закономерность снижения фитомассы кедровников в направлении с юга на север (зональный градиент) и от Урала и тихоокеанского побережья – к полюсу континентальности в центре Сибири (провинциальный градиент). Графическая интерпретация уравнений (6) и (7) дана на рис. 8.

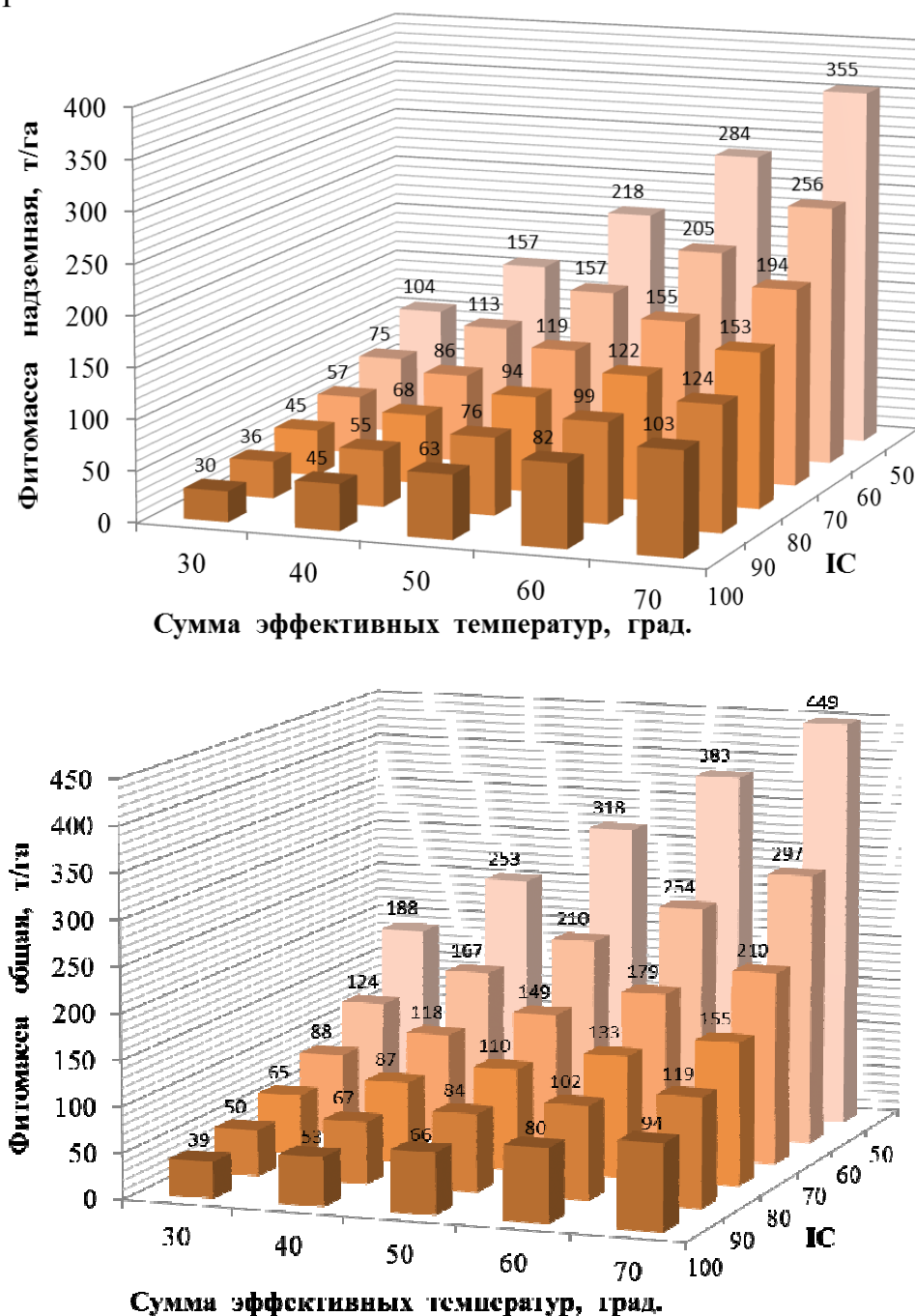


Рис. 8. Связь расчетных показателей надземной (вверху) и общей (внизу) фитомассы кедровников (*Pinus sibirica*, *P. koraiensis*) в возрасте 100 лет с индексом континентальности климата (%) и суммой эффективных температур ($^{\circ}\text{C}$).

Упомянутые выше 35 пробных площадей с данными о фитомассе кедрового стланика распределены по экорегионам следующим образом (см. рисунок 1): 12 – для северной тайги Дальнего Востока, 9 – для южной тайги в подгольцовом поясе Забайкалья и 14 – для хвойно-широколиственных лесов в подгольцовом поясе Японии.

Для выявления региональных различий фитомассы кедрового стланика упомянутые три региона закодированы блоковыми фиктивными переменными (табл. 3).

Таблица 3 - Схема кодирования региональных массивов данных о фитомассе кедровостлаников блоковыми фиктивными переменными

Регион*	X_1	X_2
ДВсев	0	0
ЗБюж	1	0
ЯПхш	0	1

*Обозначения экорегионов: ДВсев – Дальний Восток, северная тайга; ЗБюж – Забайкальская горная провинция, южная тайга; ЯП – Японские острова, хвойно-широколиственные леса.

Рассчитаны уравнения

$$\ln P_i = f(X_1, X_2, \ln H, \ln M), \quad (8)$$

где H – средняя высота, м; M – запас стволовой древесины, м³/га. Уравнения (8) объясняют от 92 до 99,9% изменчивости надземной и подземной фитомассы кедровостлаников и 79% изменчивости фитомассы нижнего яруса. Уравнение (8) совмещено с возрастными трендами средней высоты и запаса стволовой древесины кедровостлаников согласно уравнениям:

$$\ln H = f(X_1, X_2, \ln A) \rightarrow \ln M = f(X_1, X_2, \ln A, \ln H). \quad (9)$$

Последовательным табулированием рекурсивных систем уравнений (9) и (8) по задаваемым значениям возраста кедрового стланика получены возрастные тренды показателей фитомассы по каждому экорегиону. Запасы общей фитомассы в 100-летних кедровостланиках закономерно возрастают по зональному градиенту в последовательности: северная тайга Дальнего Востока, южная тайга Забайкалья, субтропики Японии, составляя соответственно 32, 38 и 145 т/га. Их фракционная структура представлена на рис. 9.

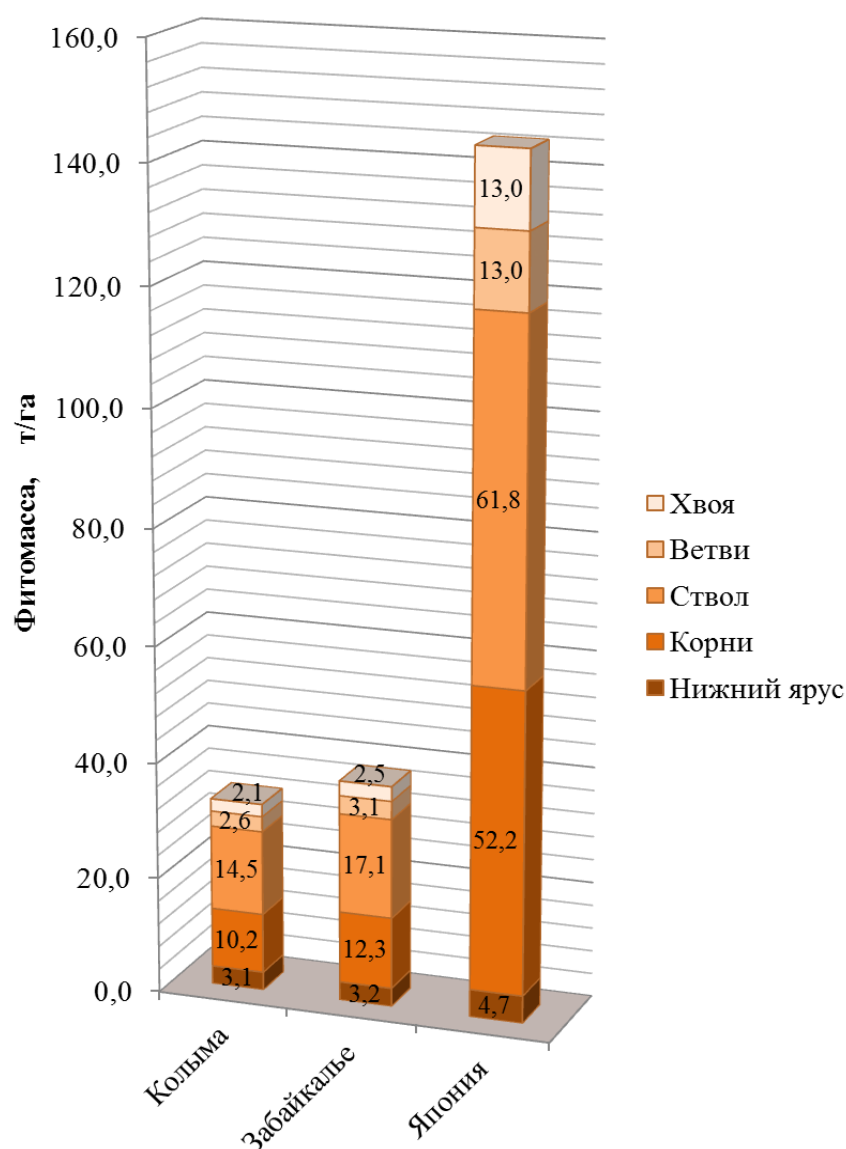


Рис. 9. Структура фитомассы 100-летних кедровостла-ников в трех экорегионах на востоке Азии

2. География ЧПП и УдЧПП кедровников

На основе сформированной базы данных из 50 пробных площадей необходимо выяснить, есть ли различия кедров сибирского и корейского по структуре ЧПП и УдЧПП. Для этого в регрессионные уравнения включена по аналогии с уравнением (2) бинарная переменная X и рассчитаны системы связанных уравнений для ЧПП:

$$\ln M = f(\ln A, X) \rightarrow \ln(Z_i/M) = f(\ln A, X) \quad (10)$$

и для УдЧПП:

$$\ln M = f(\ln A, X) \rightarrow \ln(Z_i/P_i) = f(\ln A, X), \quad (11)$$

где P_i и Z_i - соответственно фитомасса и годовичная ЧПП стволов с корой, хвои, скелета ветвей, корней, нижнего яруса, т/га; Z_i/P_i – УдЧПП, т/т. Коэффициенты R^2 варьируют от 0,70 до 0,96. Составленные по уравнениям (10) и (11) таблицы возрастной динамики ЧПП и УдЧПП показали, что ЧПП кедр корейского статистически значимо превышает ЧПП кедр сибирского: по стволам, хвое, ветвям и общей ЧПП соответственно на 64, 28, 10 и 27%. Фракционные соотношения ЧПП двух пород составляют: у кедр сибирского ЧПП стволов, хвои, ветвей и корней соотносятся как 34, 30, 9 и 27, а у кедр корейского как 44, 30, 8 и 18%, т.е. у кедр корейского по сравнению с сибирским в общей ЧПП больше доля стволов, но меньше - корней. УдЧПП кедр корейского превышает таковую кедр сибирского в большей степени, чем ЧПП: по стволам, хвое, надземной и общей соответственно в 2,2; 2,0; 1,4 и 1,8 раза.

Для географического анализа фитомассы и годовичной ЧПП кедров сибирского и корейского (т/га) мы расчленили исходные данные по экорегионам с соответствующими сдвигами их блоковыми переменными, как показано в табл. 4.

Таблица 4 - Схема кодирования блоковыми переменными региональных массивов данных о фитомассе и ЧПП кедровников

Экорегион*	X_1	X_2	X_3	* УРср – Уральская провинция, средняя тайга; ЗСюж – Западносибирская провинция, южная тайга; КИТюж – северо-восток Китая, южная тайга; КИТхш – то же, хвойно-широколиственные леса.
УРср (<i>Pinus sibirica</i>)	0	0	0	
ЗСюж (<i>P. sibirica</i>)	1	0	0	
КИТюж (<i>P. koraiensis</i>)	0	1	0	
КИТхш (<i>P. koraiensis</i>)	0	0	1	

Для ЧПП кедровников рассчитана система связанных уравнений

$$\ln M = f(X_0, X_1, X_2, X_3, \ln A) \rightarrow \ln(Z_i/M) = f(X_0, X_1, X_2, X_3, \ln A). \quad (12)$$

Поскольку при расчете аналогичных уравнений для УдЧПП запас M статистически незначим, первое звено в системе (12) исключено, и расчет выполнен по уравнению, имеющему общий вид

$$\ln(Z_i/P_i) = f(X_0, X_1, X_2, X_3, \ln A). \quad (13)$$

Коэффициенты R^2 для фракций фитомассы древостоев варьируют в (12) от 0,81 до 0,93 и в (13) – от 0,78 до 0,97. Табулированием уравнений (12) и (13) по задаваемым значениям возраста получены возрастные тренды ЧПП и УдЧПП кедровников по каждому экорегиону. На рис. 10 и 11 показаны их соотношения для возраста 100 лет. На рис. 10 снижение показателей ЧПП кедровников в направлении от Уральской к Западносибир-

ской провинции с 7,9 до 6,3 т/га объясняется увеличением индекса континентальности климата, а увеличение ее в северо-восточном Китае в направлении от южной тайги к хвойно-широколиственным лесам с 7,8 до 11,1 т/га происходит под влиянием повышения среднемесячной суммы эффективных температур выше $+5^{\circ}\text{C}$ за вегетационный период.

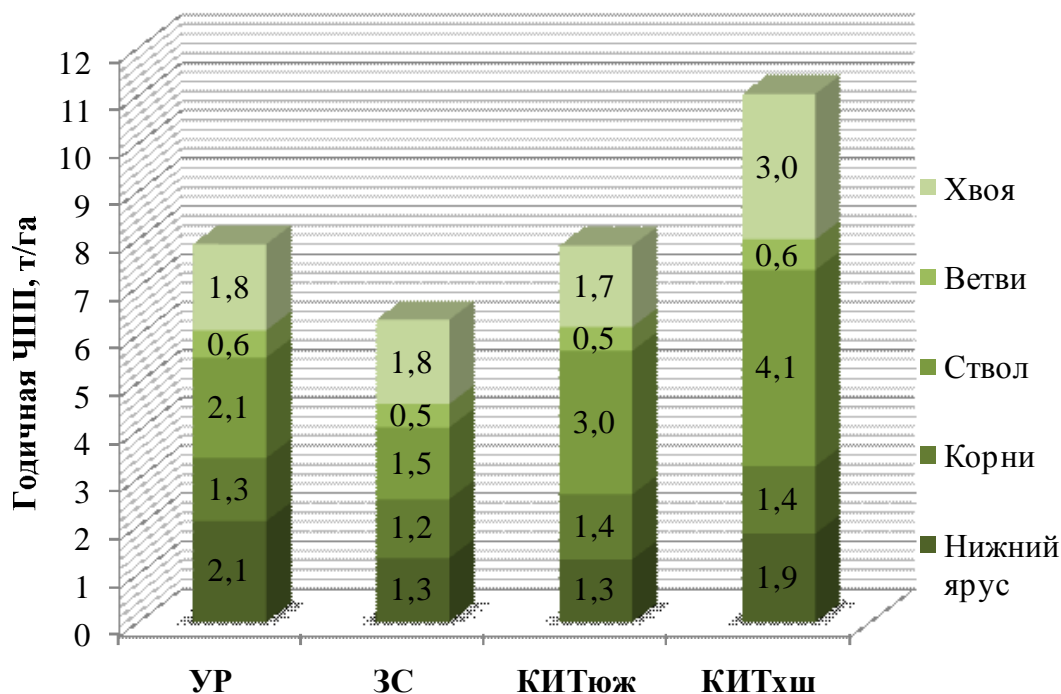


Рис. 10. Региональное изменение структуры ЧПП кедровников в возрасте 100 лет.

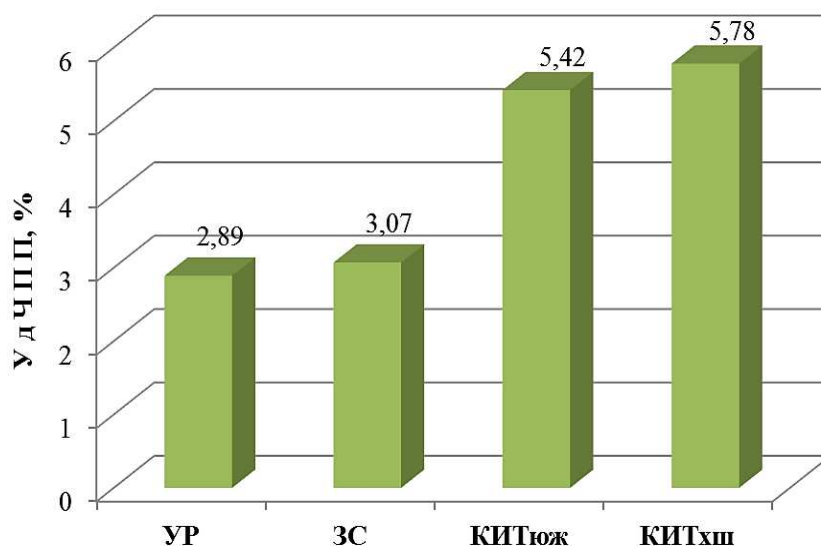


Рис. 11. Региональное изменение общей (надземной и подземной) УдЧПП кедровников в возрасте 100 лет.

На рис. 11 показано последовательное увеличение УдЧПП кедровника сибирского в направлении от средней тайги Урала (2,9%) к южной тайге Западной Сибири (3,1%) и затем в Китае (кедр корейский) – от южной тайги

(5,4%) к хвойно-широколиственным лесам (5,8%). Таким образом, в направлении от Урала до Китая происходит удвоение УдЧПП кедровников. По фракционному составу наибольшая скорость обновления органического вещества в фитомассе и, следовательно, скорость «работы» вещества, у кедра сибирского в возрасте 100 лет свойственна хвое (21-22%). Существенно ниже (3,0-4,3%) она по ветвям и корням и наименьшая – по стволам (1,5-1,8%). Аналогичные показатели у кедра корейского составляют соответственно 27-48%; 3,2-3,5% и 3,3-3,4%.

Выполненные два исследования ЧПП и фитомассы в кедровостланиках: одно в России Т.М. Панченко (1985) и одно в Японии (Kajimoto, 1996) дают возможность в первом приближении сравнить ЧПП и УдЧПП кедрового стланика с кедром сибирским и корейским. Эти соотношения видоспецифичны в зависимости от рассматриваемого показателя. Так, в 100-летнем возрасте общая ЧПП насаждений кедра сибирского и корейского больше, чем кедровостлаников на Колыме в 1,3-1,7 раза. По показателю УдЧПП закономерность меняется на противоположную: УдЧПП по общей фитомассе в кедровостланике на Колыме в 3,5 раза превышает аналогичный показатель у кедра сибирского и вдвое – у кедра корейского. В 200-летнем возрасте превышение по ЧПП древостоев кедра сибирского и корейского над кедровостланиками на Колыме примерно 2-кратное, а по УдЧПП закономерность меняется на противоположную: превышение вторых над первыми по данному показателю варьирует от 2- до 3-кратного.

При приблизительном равенстве как общей фитомассы, так и общей ЧПП, кедровостлаников на плакорах Колымы и на горе Кинпу в Японии, их фракционная структура существенно различается: если по массе и ЧПП хвои вторые превышают первые соответственно в 4 и 6 раз, то по скелетной надземной части, напротив, первые превышают вторые соответственно в 2 и 7 раз. УдЧПП хвои и общая УдЧПП в кедровостланиках Японии превышают таковые Колымы в 1,6 раза. При одинаковом возрасте (40 лет) кедровостлаников под пологом лиственницы на Колыме и на верхней границе леса в Японии их фракционная структура также существенно различается: по массе хвои и общей вторые превосходят первые соответственно в 24 и 2,2 раза. По ЧПП расхождения значительнее: вторые превышают первые по ЧПП скелетной части в 8 раз и хвои – в 41 раз. Общая УдЧПП кедровостлаников Японии превышает таковую кедровостлаников под пологом лиственницы на Колыме в 18 раз.

Таким образом, установлены статистически значимые закономерности изменения фитомассы, ЧПП и УдЧПП по экорегионам Азии в пределах ареалов кедра сибирского, корейского и кедрового стланика. Полученные результаты могут быть использованы в ресурсоведческом и лесоэкономическом аспектах, а также при разработке системы глобальных экологических услуг.

Список использованной литературы

Антанайтис В.В., Загреев В.В. Прирост леса. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 200 с.

Анучин Н.П. Лесная таксация. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 532 с.

Базилевич Н.И., Гребеничиков О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.

Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 381 с.

Борисов А.А. Климаты СССР. М.: Просвещение, 1967. 296 с.

Бузыкин А.И., Исмагилов А.М., Суворова Г.Г., Щербатюк А.С. Оценка продуктивности деревьев и древостоев // Лесоведение. 1991. № 6. С. 16-25.

Вудвелл Д.М., Хафтон Р.Э. Тайна великого северного леса // Устойчивое развитие бореальных лесов: Тр. VII ежегодной конфер. МАИБЛ. М.: Федеральная служба лесн. хоз-ва РФ, 1997. С. 39-46.

Гульбе Я.И., Гульбе Т.А., Гульбе А.Я., Ермолова Л.С. Удельная продуктивность фитомассы древостоев основных лесообразующих пород // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии. Материалы международной конференции. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. С. 197-200.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.

Кайрюкитис Л.А. Научные основы формирования высокопродуктивных елово-лиственных насаждений. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 208 с.

Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.

Коропачинский И.Ю. Древесные растения Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 383 с.

Моисеев Н.Н. Экология человечества глазами математика (человек, природа и будущее цивилизации). М.: Молодая гвардия, 1988. 254 с.

Науменко И.М. Текущий объемный прирост насаждений // Науч. записки Воронежского лесохозяйственного ин-та. Т. 9. Воронеж: Воронежск. областное книгоизд-во, 1946.

Орлов М.М. Лесная вспомогательная книжка для таксации и технических расчетов. М.: Государственное техническое издательство, 1928. 757 с.

Панченко Т.М. Продуктивность кедрового стланика в фитоценозах юга Магаданской области // Ботан. журн. 1985. Т. 70. № 1. С. 67-76.

Русаленко А.И., Петров Е.Г. Определение прироста фитомассы в сосновых насаждениях // Текущий прирост древостоев (материалы научной конференции). Минск: Изд-во “Ураджай”, 1975. С. 139-140.

Турский Г.М. Очерки по теории прироста. М.: Кооперативное изд-во «Жизнь и знание», 1925. 72 с.

Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов: Методы изучения и результаты // Лесоведение и лесоводство: Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1975. Т. 1. С. 9-189.

Уткин А.И., Гульбе Я.И., Гульбе Т.А., Замолотчиков Д.Г. Связь надземной чистой первичной продукции с фитомассой и с запасами насаждений (поиск моделей по материалам базы данных) // Структурно-функциональная организация и динамика лесов. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 2004. С. 477-479.

Хлюстов В.К., Макаренко А.А. Зависимость текущего прироста от полноты древостоев // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1983. № 8. С. 88-91.

Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 367 с.

Clark D.A., Brown S., Kicklighter D.W., Chambers J.Q., Thomlinson J.R., Ni J. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods // Ecological Applications. 2001. Vol. 11. No. 2. P. 356-370.

Fowler A., Low K., Stone J. Earth observation for sustainable development: Using space-based technology for monitoring Canada's forests // Information Forestry. April 2002. Canadian Forest Service. Pacific Forestry Centre. Victoria; British Columbia. P. 6-7.

Gower S.T., Vogel J.G., Norman J.M., Kucharik C.J., Steele S.J., Stow T.K. Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102, No. D24. P. 29-41.

Kajimoto T., Kurachi N., Chiba Y., Utsugi H., Ishizuka M. Effects of external factors on growth and structure of *Pinus pumila* scrub in Mt. Kinpu, Central Japan // Climate change and plants in East Asia. K. Omasa, K. Kai, H. Taoda, Z. Uchijima, M. Yoshino, eds. Tokyo: Springer-Verlag, 1996. P. 149-156.

Lieth H. Modeling the primary productivity of the world // Lieth H., Whitaker R.H. (eds.). Primary productivity of the biosphere. New York: Springer-Verlag, 1975. P. 237-263.

Prodan M. Messung der Waldbestände. Frankfurt/M: J.D. Sauerländer, 1951. 260 S.

Satoo T., Madgwick H.A.I. Forest Biomass. Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers, 1982. 152 p. (Forestry Sciences. No. 6).

Tuhkanen S. A circumboreal system of climatic-phytogeographical regions // Acta Bot. Fennica. 1984. Vol. 127. P. 1-50.

Wenk G. Ertragskundliche Grundlagen der Bestandesbehandlung. DDR; Tharandt: Bereich Forsteinrichtung und forstliche Ertragskunde, 1973a. 237 S.

Wenk G. Mathematische Formulierung von Wachstumsprozessen // Biom. Zeitschrift. 1973b. Bd. 15. S. 345-362.

Whittaker R. H., Likens G. E., Lieth H. Scope and purpose of this volume// Ecological studies: Analysis and synthesis.- 1975.- Vol. 14.- P. 3-4.